

Title	<大学の研究・動向> ナノ・エコの世紀におけるプラズマ 応用技術の展開
Author(s)	橘, 邦英; 八坂, 保能; 白藤, 立; 中村, 敏浩; 久保, 寔
Citation	Cue : 京都大学電気関係教室技術情報誌 (2002), 9: 3-7
Issue Date	2002-06
URL	<a href="http://dx.doi.org/10.14989/57841">http://dx.doi.org/10.14989/57841</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

## 大学の研究・動向

# ナノ・エコの世紀におけるプラズマ応用技術の展開

電子物性工学専攻電子物理学講座プラズマ物性工学分野

教授 橘 邦 英

tatibana@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教授 八 坂 保 能

yasaka@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教授 白 藤 立

(国際融合創造センター融合部門兼)

shira@iic.kyoto-u.ac.jp

講師 中 村 敏 浩

(ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー兼)

tosihiko@kuee.kyoto-u.ac.jp

助手 久 保 寔

mak-kubo@plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

電子とイオンの集合体としてのプラズマは、長距離に及ぶ荷電粒子間のクーロン相互作用によって複雑な集団的挙動を現わすため、これまで主に物理的な側面からの基礎研究や応用研究がなされてきた。1970年代の後半になって、プラズマ中のイオンや中性ラジカルのもつ大きな内部エネルギー状態の高い反応性を利用して、材料の微細加工や薄膜形成など、化学的側面からの応用分野が展開してきた。しかし、21世紀においてプラズマが学術研究の対象として存続し、新しい産業基盤を創成していくためには、もう一度プラズマのもっている特性を見直して、新しい可能性を発掘していく必要がある。すなわち、①発光性、②導電性、③誘電性、④反応性などの性質を極限まで高めたり、それらを組み合わせる新しい応用の展開をはかりたりすることが重要である。

プラズマの状態を表わすパラメータとして、電子あるいはイオンの温度  $T_e$ ,  $T_i$  や密度  $n_e$ ,  $n_i$  があり、例えば、自然界や人工的なプラズマ中での  $n_e$  は  $10^4 \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$  の範囲に及ぶ。従って、上に述べた性質①～④も広い範囲で変化させることができる。また、プラズマの容積も従来の数cm～数mのマクロなスケールから、最近ではmmから $\mu\text{m}$ スケールの微小なものにも興味をもたれている。我々は、ナノテクノロジーや環境適合技術に関連した種々のプラズマについて、図1に示すような「造る（生成）・診る（診断）・使う（応用）」という観点から、多様な研究を展開している。

## 2. 反応性プラズマの診断と材料プロセスへの応用

分子ガスを用いることによって、気相や表面での化学反応を活性化し、固体材料の表面でエッチング（微細加工）、デポジション（薄膜堆積）、モデフィケーション（表面改質）などのプロセスを行なうことができる。それらをリソグラフィの技術と組み合わせることによって、現在の超LSIの加工が行なわれている。図2は1 Gbit世代でのDRAMのメモリセルの1例で、基本構造はスイッチング用のMOS-FETとメモリ容量のキャパシタとから成っている。これまでは、材料としてSiとその酸化物である $\text{SiO}_2$ および配線用のAlが使われてきたが、次世代では層間の絶縁膜に低誘電率の材料、キャ



図1 プラズマ物性工学分野での研究対象

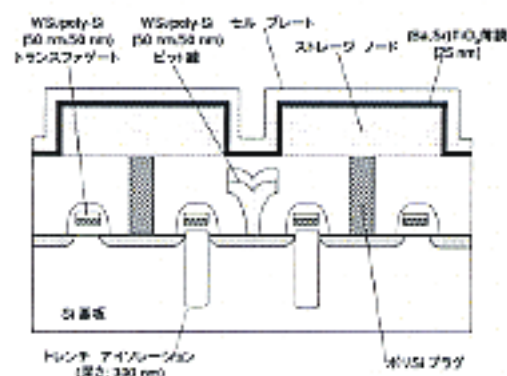


図2 1 Gbit DRAMのセル構造の例

パシタには高誘電率の材料、さらに配線には低抵抗のCuなどの薄膜材料が要求されるようになってくる。

### (1) 低誘電率薄膜のプラズマCVD

層間絶縁膜の低誘電率化には、フッ素を含有した $\text{SiO}_2$ や非晶質炭素(a-C:F)の薄膜、有機系ポリマ膜などが試用されている。しかし、将来の50nmノードに対応するためには比誘電率を1.5程度にまで低減する必要があり、nmスケールでの多孔質化が不可欠になると予測されている。我々は、 $\text{C}_4\text{F}_8$ 、 $\text{C}_5\text{F}_8$ 、 $\text{C}_6\text{F}_6$ などの種々のフロロカーボンガスを原料に用いたプラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) によって低誘電率のポリマ膜を形成し、その後の湿式あるいは乾式処理によってそれを多孔質化する技術を研究している。

a-C:F系の膜は、段差被覆性に優れフレキシビリティがあるため、フラットパネルディスプレイとして有望な有機ELのパッシベーション膜としての用途も検討されている。しかし、その目的のためには、水やガスに対するバリア性も必要になるので、それらの特性を兼ね備えた薄膜を如何に作成するかについても研究を進めている。

### (2) 選択性向上を目指したプラズマエッチングにおける反応解析

超LSIの製造ではゲートやコンタクトホールなど、高アスペクト比のパターン形成でナノメートル精度のエッチング技術が要求されている。例えば、図3に示すように、FETのソースやドレインとの

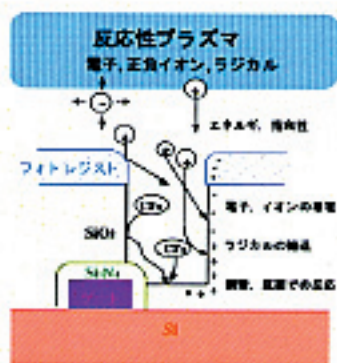


図3 コンタクトホールのエッチングにおける電子、イオン、ラジカルの挙動

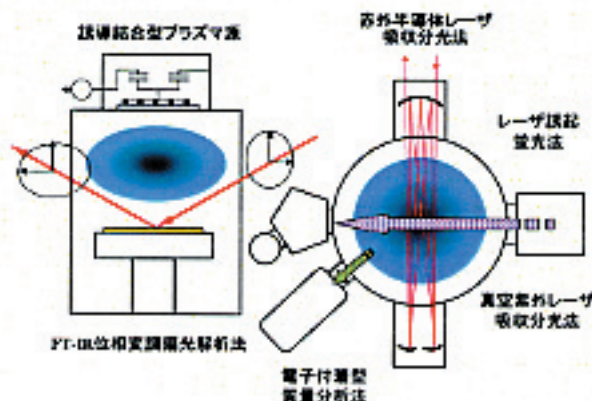


図4 プラズマプロセスにおける気相・表面診断法

配線のために層間絶縁膜のSiO<sub>2</sub>にコンタクトホールを形成する場合には、下地のSiやマスクのフォトリソ、ならびにゲートを自己整合的に保護するための窒化膜(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)に対して高い選択比が要求される。材料との反応性の違いを発現させるためには、プロセスガスとして用いられるフロロカーボンガスのプラズマ中におけるラジカル組成やイオンの衝撃エネルギーを高度に制御する必要がある。そのためには、プラズマ源（装置の寸法・形状、電力結合の方法など）やその動作条件（ガス種、圧力、流量など）と生成されたプラズマの特性を関連付ける診断が必要であるが、我々は、図4のような種々の分光学的手法によって気相でのラジカルやイオンの計測を行なうとともに、反応が進行中の表面における化学結合を赤外域の吸収法や偏光解析法によって診断し、表面における反応過程を解析している。

近い将来、低誘電率材料に対する高選択性、高異方性のエッチングが必要になってくる。O<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>を用いたエッチングでは加工形状が等方的になりやすいため、N<sub>2</sub>やHH<sub>3</sub>などを添加ガスとして用いる試みがなされているが、反応機構や異方性の発現機構についてはまだよくわかっていない。その機構解明やプロセス特性の改良にでも取り組んでいる。

### 3. マイクロプラズマの生成・診断とその応用

プラズマTVという名称でPDP (Plasma Display Panel) が次第に普及しはじめてきた。PDPでは、Ne-Xe混合ガスを封入した数100μmサイズの放電セル内で、励起状態のXe\*原子やXe<sub>2</sub>\*分子から放射される紫外線を内面に塗布した蛍光体で可視光に変換しているが、RGBの3つのセルで1画素を形成し、それをパネル上に100万個程度配置している。また、最近、液晶プロジェクタが随分明るくなってきたが、その光源は電極ギャップが1mm程度の超高圧水銀灯である。また、ハロゲン化物を封入した高輝度放電(HID)ランプも民生用途で小型化してきている。このように、従来の放電管とはサイズも動作圧力も大きく異なる領域で新しい応用が展開してきている。我々は、そのような方向をさらに一般化して捉えることによって、マイクロプラズマと呼ぶべき新領域が開拓できるのではないかと考えて研究を進めている。

#### (1) PDP用マイクロプラズマの診断

現在のPDPでは、一対の透明電極をガラス基板（前面基板）上に配置し、その表面を誘電体と保護膜(MgO)の積層膜で被覆している。背面板上には誘電体の隔壁が設けられ、その内表面には蛍光体が塗布されている。その下には選択したセルで放電を開始させるためのアドレス電極が設けられている。このような3次元構造の微小な放電セル内での放電現象や発光特性を評価する目的で、紫外発光のもとになっている励起状態Xe原子の密度の時空間変化を測定するための図5のような3次元計測

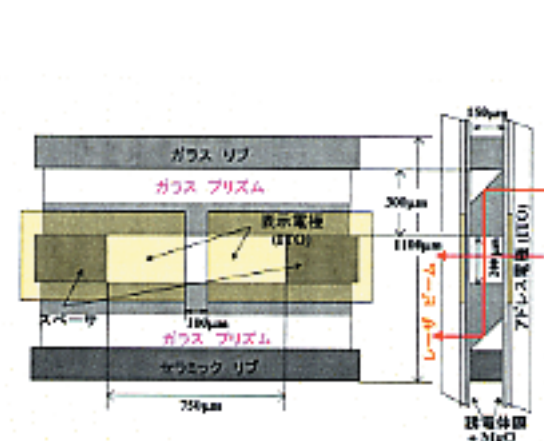


図5 3次元観測用PDP放電セルの構造

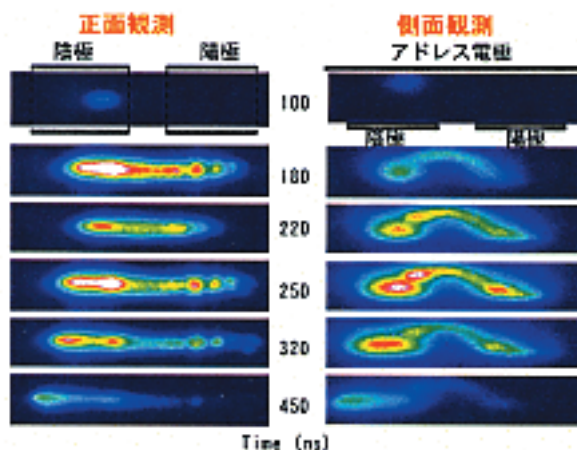


図6 近赤外発光の時間変化の正面・側面像



セルを試作して測定を行なっている。  
図5に示したように、正面と側面からの同時観測を可能にするためにガラスプリズムを隔壁として用い、蛍光体は塗布していない。図6は、電流が最大となる時間での発光の様子をゲート付CCDカメラで観測した例を示している。動作条件による放電の変化の様子を3次元的に解析できるので、シミュレーションとの比較によって放電や発光の物理現象が定量的に理解でき、セルの設計や効率の最適化の基礎データとして活用できる。

## (2) ミクロ反応場の創成と新規応用

マイクロプラズマのサイズや動作ガ

ス圧をパラメータとして2次元の平面上に示し、プラズマ密度を縦軸にとって、予測される応用技術の領域を表示してみると図7のようになる。PDPと同等のサイズでも、圧力やプラズマ密度領域が次第に大きくなると微小化学分析法としての $\mu$ TAS(Total Analytic System)への応用、真空紫外～極端紫外光源への応用が考えられる。また、サイズがもう少し小さいところでは、マイクロマシーン(Micro Electro Mechanical System)の加工用ツールとしての応用や、最初に述べた①～④の特性を利用したプラズマデバイスとその集積化したものなどに新しい展開が期待される。一般に、放電でプラズマを生成しやすくするためには、体積が微小になるにつれてガス圧を増やす必要があるが、 $\mu\text{m}$ ～ $\text{nm}$ 領域では数10～数100気圧の動作ガス圧が最適となる。そのような超臨界状態付近の高密度ガス中では、原子や分子が量子統計的に会合(クラスターリング)や分離を起こしており、放電やプラズマの特性、さらに電離媒質としての反応性などが大きく変化する可能性もあって、物理的にも大きな興味を持たれる。

## 4. $\text{D-}^3\text{He}$ 核融合のための基礎研究

重水素とヘリウム3( $\text{D-}^3\text{He}$ )などの先進燃料を用いる核融合では、実現に高温度を要するものの、発生エネルギーが中性子ではなく電子やプロトンなどの荷電粒子により担われる。そのため、高 $\beta$ 値(プラズマ圧力/磁気圧力)のプラズマ装置に直接エネルギー変換を適用して、高効率で環境保全性に優れた核融合炉の実現が期待できる。このような目的のための基礎的研究も進めている。

### (1) タンデムミラープラズマの制御

我々が現在使用している装置はHIEIタンデムミラーと称し、2段のミラー磁場配置をもつものである。その特徴は、プラズマの制御にイオンサイクロトロン周波数帯の高周波(ICRF波)を活用し、単純性と小型性を引き出している所にある。これまでに、ICRF波の動重力によるフルートモード不安定性の安定化、回転モードICRF波による高密度プラズマ生成、2種イオンプラズマにおける速波から遅波へのモード変換を利用した加熱、速波の静電波へのモード変換と電子加速による閉じ込め電位形成、リミタ/エンドプレートバイアスによる非線形な状態遷移と閉じ込め改善、ダイバータ磁場配位による安定化などに関する研究成果を得てきた。

### (2) 直接エネルギー変換

$\text{D-}^3\text{He}$ 核融合プラズマから流出する高エネルギー粒子を電界で減速して、その運動エネルギーを直接電気

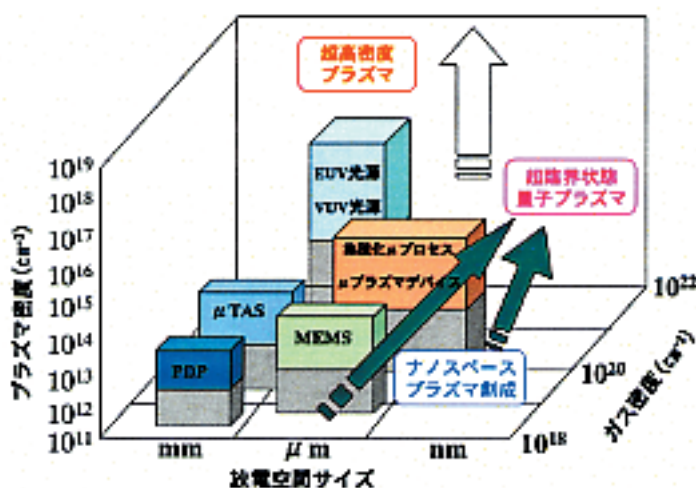


図7 マイクロプラズマのパラメータ領域と応用技術

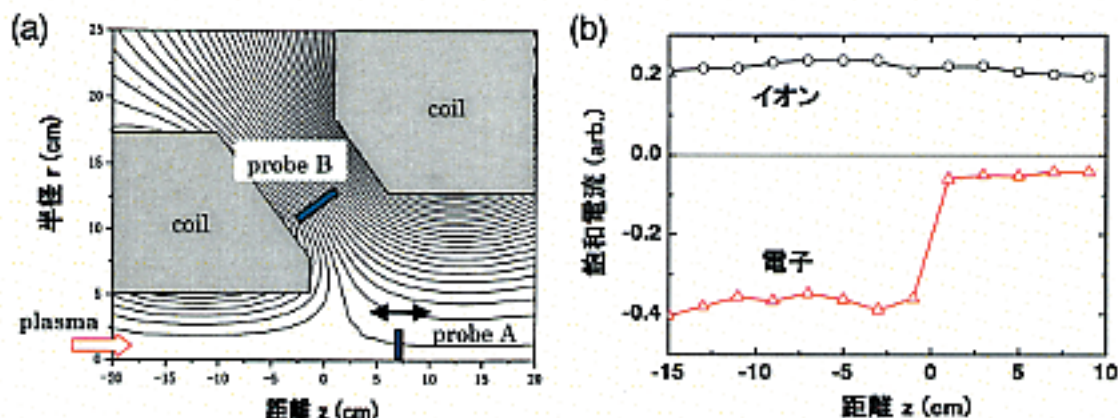


図8 カスプ磁場型直接エネルギー変換器における(a)磁力線分布と(b)プローブAでの電子、イオン飽和電流

エネルギーに変えるためには、電子、熱化イオン、15MeVの高速プロトンを分離選別し、それぞれのエネルギーに適した減速器に導入する必要がある。我々は、カスプ磁場を利用した電子とイオンの分離方式、およびイオンビームと高周波進行波の相互作用を利用したプロトン減速方式に関する基礎的研究を行っている。図8(a)はカスプ磁場実験装置の磁力線分布を示す。マイクロ波放電により発生したプラズマをカスプ磁場に流入させ、 $z$ 軸上の平板プローブAに流入するイオン、電子飽和電流を測定すると、図8(b)のように $z < 0$ の領域ではイオン、電子両方の電流が観測されるが、 $z > 0$ では電子飽和電流は大きく減少して、イオン電流の電子電流に対する比はきわめて大きくなる。一方、装置の半径方向外側に設置したプローブBでは電子電流が支配的になる。適切な条件のもとでの電子・イオンの分離率は95%以上になり、カスプ磁場による電子とイオンの分離が実証された。また、低エネルギーイオンビームに速度変調を与えバンチングを起こさせた後、高周波進行波を作用させる実験を行なって、進行波減速部の長さ1波長あたり約15%のエネルギー変換効率を得た。これにより4波長の長さを採用すれば60%程度の高効率が期待できることが明らかになった。

## 5. おわりに

21世紀では、プラズマ応用技術もナノテクノロジーにおける超微細加工ツールとして、あるいはプラズマそのものをマイクロにすることなどから新たな活路を見出していく必要がある。他方では、エコロジ技術への適応も一つの方向であろう。そこでは、排ガスや廃棄物の処理という概念だけでなく、リサイクルを可能にする技術の開発が鍵となるであろう。また、エネルギー関連でも高効率で環境共生型の技術展開を指向していくことが必要である。